

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(c)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560301

研究課題名（和文）

ハイブリッドカー用インバータ駆動モータの耐サージ絶縁診断技術開発と実用化

研究課題名（英文）Development and Practical Use of Electrical Insulation Diagnosis for Inverter-Fed-Motors in Hybrid-Car under Repetitive Surge Voltages.

研究代表者

門脇 一則 (KADOWAKI KAZUNORI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60291506

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、ハイブリッドカー用電気絶縁材料の繰り返し部分放電開始電圧(RPDIV)の自動評価装置を開発し、これを広く社会に普及することにより、インバータ駆動モータ用絶縁材料の評価手法の標準化を進めることである。パワーエレクトロニクス制御で動くモータに繰り返し侵入する急峻なサージ電圧を出力する繰り返しパルス電源と、部分放電開始電圧自動計測システムを、研究期間内に開発した。最終年度には、国内材料メーカーにおける信頼性評価用設備としての実用化にこぎつけた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is not only to develop an automatic measurement system of repetitive partial discharge inception voltage (RPDIV) for inverter-fed motors but also to promote the standardization of the measurement system. Both a repetitive high voltage pulse generator producing modified-inverter-surges from power-electronics circuits and a RPDIV measurement system are developed during the research period. Eventually, the both equipments are adopted as the evaluation system for electrical insulating materials in a domestic manufacturer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気絶縁材料，インバータサージ，劣化診断

1. 研究開始当初の背景

環境保全意識の高まりと共にハイブリッドカーが普及しつつある昨今において、小型高性能のインバータ駆動モータが量産されている。インバータ電源を用いることの多い

回転機にはインバータサージという予想外の過電圧が加わるため、最近のデバイスの小型化・高電圧化に伴い耐インバータサージ性能の向上が要求されている。しかし過去における絶縁材料の劣化診断といえば、その多く

が電力用機器の交流高電界下での部分放電計測であり、インバータサージの繰り返し印加による劣化の進展機構と破壊の物理については産学両面において十分な研究がなされていない。

国外において注目すべきは、IEC（国際電気標準会議）において、インバータサージ絶縁に関連した規格化が活発に進んでいる点である。IECでは、大出力インバータ駆動モータの大量生産と時期をあわすように、各種の技術報告や技術仕様の中で、ガイダンスや暫定的評価法などが提案されている。このような状況のもと2007年8月に電気学会では、「繰り返しインパルスにおける部分放電計測調査専門委員会」を設置し、評価方法の確立とその標準化を産学一体となって進めている。

これまでに本研究代表者は、プラズマを用いた排ガス処理や水処理に関する研究を進めてきた。その過程で、ナノ秒領域で高電圧パルスの極性を繰り返し反転させるパルス発生技術を独自に構築した。以前から、この装置を用いてハイブリッドカー用絶縁材料の耐インバータサージ性能を、評価してほしいとの引き合いが、国内メーカーから寄せられている。劣化から破壊に至るまでの過程を検討するには、パルス波高値、幅および繰り返し周波数などのパラメータを容易に調整できる電源が必要である。本装置は最大波高値10kV、パルスの立ち上がり20ナノ秒、パルス幅数十ナノ秒〜数マイクロ秒の極性反転繰り返しパルスを印加することができる。しかも、この電源の出力電圧と、インバータサージはほぼ同じ波形であることから、この電源を評価技術に応用することは有効であると考えた。

2. 研究の目的

- (1) インバータ駆動モータに用いられている各種絶縁材料に対して極性反転繰り返しパルス電圧を印加した場合における、絶縁劣化の物理の解明。
- (2) 耐インバータサージ性能におけるひとつの尺度である、繰り返し部分放電開始電圧 (RPDIV) を、全自動で評価できるシステムの開発と、その実用化。

3. 研究の方法

- (1) **モータ制御回路基板の劣化診断**
極性反転繰り返しパルスに曝されたインバータ制御用回路基板の絶縁劣化機構を解明する。通常の交流電圧印加時においても、部分放電からトリートが進展し絶縁破壊に至るまでの間における部分放電の $\phi-q-n$ パターンをモニタリングすることにより劣化度を診断できるこ

とは良く知られている。繰り返しパルスの場合は、 $\phi-q-n$ 測定ができないことから、音響的手法もしくは統計的手法を用いた部分放電計測により、基板（複合シート）の劣化状態の把握を試みる。

- (2) **全自動RPDIV評価装置の構築**
高性能オシロスコープが無くても、容易かつ高い信頼度でRPDIVを計測できる安価な装置を作る。微小かつ極短の部分放電信号を、論理信号に変換する機能を有する光検出器を独自に製作し、さらにこの論理信号の取り込みと記録、および極性反転繰り返しパルスの印加手順を全てパソコンで制御することにより、オシロスコープが無くても部分放電発生確率を評価することのできる装置を開発する。最初は、研究室単独でシステム全体の試作と、その妥当性の確認を行う。その後、一般企業への技術移転を目指す。

4. 研究成果

(1) モータ制御回路基板の劣化診断

これまで、インバータサージによるエナメル線の劣化の研究は数多くなされているが、インバータ制御回路基板の劣化に関する研究はほとんどなされていない。本研究では、実際の製品であるエポキシ樹脂基板に対して極性反転繰り返しパルスを印加したときの寿命特性を調べた。数多くの統計データを蓄積してきたが、以下ではその一部を紹介する。

試料は、ビスフェノールAエポキシ樹脂に、硬化剤としての酸無水物と、充填材としての窒化ホウ素よりなる混和物を、厚さ100 μm の銅板上に厚さ100 μm の絶縁層として高温下で成形することにより得られた複合シートである。この試料の銅板側を下にして、上側に電極を置いた状態で電圧を印加した。上部電極端部周辺を樹脂モールドした場合と、モールドせずに上部電極端部で人為的に部分放電を引き起こした場合のそれぞれに置ける破壊機構を検討した。

上部球電極と試料表面との接点近傍での気中コロナ放電を、光電子増倍管(浜松ホトニクス(株), H5783-06)で検出した時の光信号波形と印加電圧波形を図1に示す。最初の反転時(負から正)よりも、むしろ2回目や3回目の反転時に強く光っているのがわかる。この事実は大きなインバータサージが侵入した場合には1回の印加で放電が何度も引き起こされることを示している。次に、-5kVから+5kVの極性反転パルスにより部分放電を表面で繰り返し引き起こした場合の、複合シートと市販のポリエチレンテレフタレート(PET)シートにおける破壊遅れ時間のワイブル分布を図2に示す。

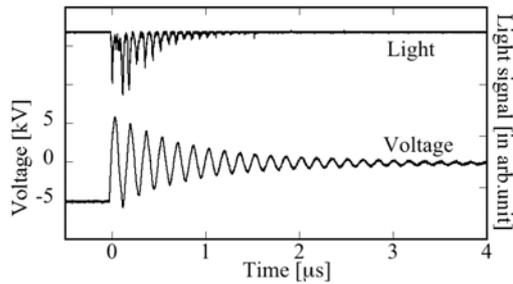


図1 極性反転パルス電圧と部分放電光の波形

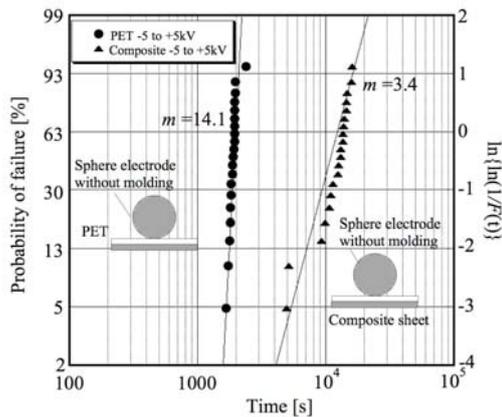


図2 上部球電極をモールドしていない状態での破壊遅れ時間のワイブル分布

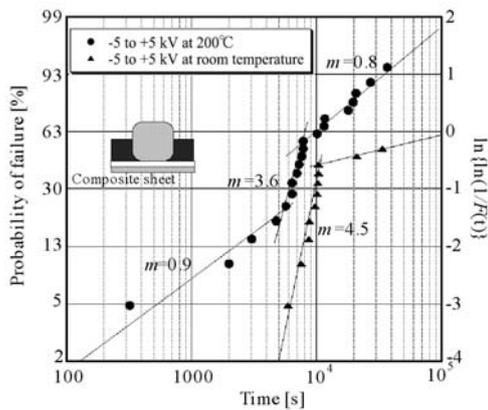


図3 上部平板電極をモールドした状態での破壊遅れ時間のワイブル分布

PETの平均破壊遅れ時間が2000秒であるのに対し、複合シートのそれは13000秒であることから、複合シートは耐コロナ性に優れた材料であることがわかる。PETの場合、コロナによる表面温度の上昇が非架橋の高分子を軟化するため時間と共に絶縁性が低下し、比較的早い時間に破壊が引き起こされている

と思われる。これに対して、架橋構造を有すると共に、放熱性の高い複合シートの場合は、コロナによる軟化は認められず、表面層が徐々に摩耗していく傾向が認められた。両者の違いは平均遅れ時間だけではなく、プロットの傾き、すなわち遅れ時間分布のばらつきにおいても認められる。プロットの分布を直線近似し、その傾きから求められる形状パラメータ m を求めたところ、PETが $m=14.1$ に対し、複合シートが $m=3.4$ であった。一般にプロットが、 $m>1$ の直線上に乗る場合、それらの分布は摩耗破壊モードに分類される。すなわち劣化の進行に要する形成遅れ時間を経た後に、破壊が引き起こされていることを意味する。

複合シートの破壊遅れ時間がばらつく理由として、充填材の分散状態や充填材と樹脂との密着状態の不均一性などが可能性として挙げられる。

電極周囲を樹脂モールドされた平行平板電極構成下での破壊遅れ時間分布についても複合シートとPETシートとの比較を試みた。PETの場合、室温下でパルス電源の上限電圧(5kV)を20時間印加しても、時間内に破壊した試料はひとつだけだった。このことは、樹脂モールドにより電極端部の空隙を無くせば、部分放電が抑えられ、寿命が飛躍的に伸びることを意味している。別の言い方をすれば、PETの場合には、バルク中での部分放電により劣化が進行するという過程は認められない。これに対して、室温下で複合シートに同様の条件で印加を継続したところ、20個のうち約半数の11個が絶縁破壊した。さらに、200°Cのホットプレート上に複合シートを並べた状態で印加を繰り返したところ、全ての試料が20時間以内に破壊した。図3は、樹脂モールドされた平行平板電極構成下での複合シートにおける、室温および200°Cでの破壊遅れ時間のワイブル分布である。室温下での分布において注目すべきは、破壊した試料の遅れ時間が、 10^4 秒付近に集中している点である。これらの試料の破壊遅れ分布が摩耗破壊モードを示すということは、シートの内部に部分放電のきっかけとなる弱点があったと推測する。破壊した11個に対して、試料を分解してその破壊地点を確認したところ、上部電極のエッジ部で破壊している試料はわずかにひとつだけで、残りの試料は、電極の中心付近で破壊していた。この事実は、電極のエッジが弱点部として作用するのではなく、シート内部に点在している弱点部で劣化が進行し、その位置が破壊するとみるべきである。

(2) 全自動RPDIV評価装置の構築

光検出器、繰り返しパルス電源および試料用チャンバよりなる評価装置の外観写真を

図4に示す。従来技術の場合、センサからの信号をオシロスコープ上に表示し、放電の有無を目視あるいは信号処理機能を用いて判断していた。本方法では、この判断を独自に製作した光検出器とパソコンのみで実現している。光検出器内部の光電子増倍管（浜松ホトニクス(株), H5783-06)からの微弱信号が、任意のしきい値を越えた時に、検出器の出力端から TTL レベルの論理信号がパソコンに送られる。部分放電は極めて短時間の現象である。したがって光電子増倍管からの光信号をコンパレータ回路で論理パルスにして出力するだけでは、幅が短すぎるためにパソコンの変換ボードで認識できない。そこでコンパレータ回路の後段に、パルスストレッチャ回路を組み込んでいる。パソコンは検出器から送られてきた信号の記録と計数をするだけでなく、インパルス電源の出力を制御する役割も果たしている。プログラムにより設定されたシーケンスに従って、インパルスの波高値制御用アナログ信号とスイッチング制御用の論理信号がインパルス電源に送られる。研究室のホームページに、光検出器の電子回路図や制御用プログラムを公開しているので、詳細についてはそちらを参照していただきたい。

約 70ns で立ち上がった後、指数関数的に減衰する単極性インパルスを用いて、ポリアミドイミドエナメル線のツイストペア試料に印加することにより、本手法の妥当性を確認した。マイクロ秒オーダーの幅を有するインパルスを印加した場合、パルス幅の増加と共に部分放電開始電圧が低下する報告がいくつかある。そこで本測定においても同様の傾向が認められるか否かを確認するため、立ち上がりと同じで半値幅が異なる3種類の単極性インパルスを用いた。インパルス波高値と部分放電発生確率との関係を、半値幅 3ms, 18ms および 160ms のそれぞれに対してプロットした結果を図5に示す。波尾が長くなるにつれて、RPDIV は小さくなる傾向が認められた。この傾向が意味するところの考察は別の機会に譲り、ここでは本方法を用いた場合でも、部分放電発生確率のパルス幅依存性を明確に認識できることに注目したい。さらに本研究代表者は、オシロスコープを用いた従来方法での RPDIV 測定結果と本方法での結果が、良く一致することも確認した。図5における個々のプロットは、1000回の測定結果の平均値である。従来のように、オシロスコープに一度記録してから、放電の有無を確認する作業を繰り返す方法だと、これだけのデータを処理するのに膨大な時間と労力を要する。これに対し、今回の研究により構築された本システムを用いれば、高価な計測機器を用いることなく、簡単に統計データを得ることができる。

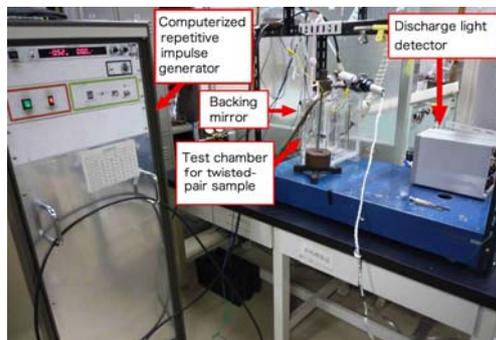


図4 PDIV 自動計測システムの外観写真

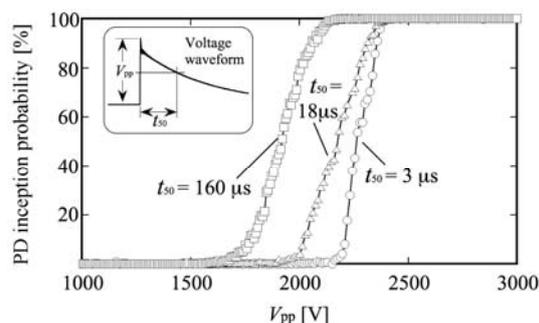


図5 電圧波高値と部分放電発生確率との関係

本手法に関する特許は出願済みであり、2010年に公開されている。さらに2011年度には、ある国内企業が、図4と同じものを、社内製品評価用設備として導入したことを付記する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

(1) 門脇一則, 竹村裕次郎, 西本 榮:「繰り返しインパルスにおける部分放電開始電圧の簡易測定法」, 電気学会論文誌 A (査読有り), Vol.132, No.9 (2012) (掲載決定)

(2) 門脇一則:「ナノ秒極性反転パルス電源の開発とその適用例」, 月刊愛媛ジャーナル (査読無し), Vol.25, No.8 (2012) pp.80-83

(3) K.Kadowaki, K.Arita, J.Etsuda, T.Ohta, S.Kiyohara, and S.Mitsuya, “Degradation Mechanism of Epoxy-Based Composite Sheet Subjected to Repetitive Voltage Pulses under High Temperature”, *Proc. IEEE Inter'l Conf. on Solid Dielectrics* (査読有り), Vol.1, (2010) pp.95-98

[学会発表] (計11件)

(1) 竹村裕次郎, 門脇一則:「低気圧下での模擬インバータサージ印加によるツイストペア試料の部分放電開始特性」, 平成23年電気学会全国大会, 2-034 (2011年3月17日) 大阪大学

(2) 有田幸司, 門脇一則, 木谷勇, 清原進, 太田司, 三屋昭治:「繰り返し反転パルスによるインバータ制御用回路基板の劣化に対する電極界面の空隙の影響」, 平成22年電気学会全国大会, 2-021 (2010年3月18日) 明治大学

(3) 竹村裕次郎, 門脇一則:「模擬インバータサージ電源の回路条件がツイストペア試料の部分放電特性に及ぼす影響」, 平成23年電気関係学会四国支部連合大会 (2011年9月23日) 阿南高専

(4) 竹村裕次郎, 門脇一則:「エナメル線間での部分放電の遅れに対する模擬インバータサージの振動周期の影響」, 平成22年電気関係学会四国支部連合大会, 1-1 (2010年9月25日) 愛媛大学

(5) 有田幸司, 門脇一則:「繰り返しパルス浴面放電による高放熱絶縁シートの劣化現象」, 平成22年電気関係学会四国支部連合大会, 11-4 (2010年9月25日) 愛媛大学

(6) 有田幸司, 門脇一則, 木谷勇:「高放熱絶縁シートと下部電極との接合界面での部分放電の圧力波」, 平成21年電気関係学会四国支部連合大会, 2-8 (2009年9月26日) 愛媛大学

(7) 竹村裕次郎, 門脇一則:「繰り返しパルス電源の出力インピーダンスがツイストペア試料の部分放電開始電圧に及ぼす影響」, 電気学会パルスパワー・放電合同研究会, PPT-11-027, ED-11-075 (2011年8月5日) 愛媛大学

(8) 有田幸司, 木谷勇, 門脇一則, 太田司, 清原進:「高温下での極性反転繰り返しパルスの頻度と振幅が高放熱絶縁シートの寿命に及ぼす影響」, 電気学会放電研究会, ED-09-195 (2009年12月11日) 愛媛大学

(9) 前嶋拓弥, 門脇一則, 木谷勇, 太田司, 清原進:「ツイストペア試料の部分放電開始電圧に対する減衰振動型ナノ秒パルスの印加条件の影響」, 電気学会放電研究会, ED-09-196 (2009年12月11日) 愛媛大学

(10) 悦田隼, 門脇一則, 太田司, 清原進, 三屋昭治:「繰り返しインパルスによる加速劣

化試験における高放熱絶縁シートの破壊機構」, 第41回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, pp.185-188 (2010年11月15日) 秋田アルベ

(11) 有田幸司, 門脇一則, 清原進, 太田司:「極性反転繰り返しナノ秒パルスの幅と立ち上がり時間が回路基板の寿命に及ぼす影響」, 第40回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, pp.185-188 (2009年8月26日) 松江テルサ

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 部分放電発生回数測定装置

発明者: 門脇一則

権利者: 愛媛大学

種類: 公開特許

番号: 特開2010-204067

出願年月日: 平成21年3月6日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ (ソフトウェア, 試作システムのURL)

<http://hv.ee.ehime-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

門脇一則 (KADOWAKI KAZUNORI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 60291506